

Таблица 1

Амплитуда напряжений цикла σ_a , МПа	Ресурс, $\times 10^6$ циклов		
	по результатам испытаний		расчетный по формуле (3)
	Вероятность 0,9	Вероятность 0,5	
65,0	0,14/0,26*	0,17	0,20
55,0	0,38/0,64	0,50	0,39
45,0	0,81/1,09	0,88	0,87
32,5	2,95/4,42	4,13	3,20
28,0	3,68/5,82	5,41	5,80

* В числителе приведены нижние значения границы доверительного интервала величины $N_{дл}$ в знаменателе — верхние.

Таблица 2

Амплитуда напряжений цикла σ_a , МПа	Длина трещины, мм		Ресурс, $\times 10^6$ циклов	
	начальная l_0	критическая $l_{кр}$	по результатам испытаний	расчетный по формуле (3)
131,5	10	120	0,05	0,05
105,0	10	120	0,18	0,12
90,0	10	120	0,24	0,22
85,0	10	120	0,26	0,28
76,5	10	150	0,37	0,42
61,5	10	120	0,60	0,99
55,0	10	120	1,10	1,55

линейными зависимостями. В табл. 2 даны оценки ресурса, полученные расчетом по формуле (3) и при стендовых испытаниях сварного соединения полосу с лонжероном рамы тележки гусеничного трактора Т-4А с постоянной амплитудой каждого уровня напряжений цикла [1]. Как видно из табл. 2, расхождение сравниваемых величин ресурса не превышает 50 %.

В заключение отметим, что при расчетах по формуле (3) принят ряд допущений при выборе величин C_1 , n , C_2 , l_0 , $l_{кр}$, что свидетельствует о возмож-

ности повышения точности расчета. Более точные оценки могут быть получены за счет совершенствования методов определения коэффициентов C_1 , n и C_2 по данным испытаний натурных объектов, а также за счет накопления информации о величинах l_0 и $l_{кр}$. Следует подчеркнуть практическую ценность накопления таких данных, позволяющих прекращать ресурсные испытания на ранних стадиях развития трещин и тем самым сокращать длительность и стоимость испытаний.

В ы в о д

Расчетные оценки средней долговечности металлоконструкций тракторов и других машин на стадии развития трещин с позиций механики разрушения с удовлетворительной точностью совпадают с результатами экспериментов, что позволяет рекомендовать формулу (3) для приближенного расчета (при соблюдении ограничений на ее применение).

Список литературы

1. Развитие трещин в металлоконструкциях тракторов и других машин/С. С. Дмитриченко, Н. М. Панкратов, Л. П. Шевченко, Н. Г. Троян. — Тракторы и сельхозмашины, 1977, № 4, с. 37—39.
2. Пэрис П., Эрдоган Ф. Критический анализ законов распространения трещин. — Труды АОИМ. Сер. Д, Техническая механика, М.: Мир, 1963, № 4, с. 60—68.
3. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
4. Фишер Д., Янь Б., Фрэнк К. Минимизация усталости и разрушения в стальных мостах. — Труды АОИМ, Сер. Теоретические основы инженерных расчетов, 1980, № 1, с. 24—30.
5. Методика и результаты стендовых испытаний металлоконструкций тракторов/Х. И. Хазанов, С. С. Дмитриченко, Р. В. Кугель, А. П. Давыдов и др. — Труды НАТИ, М.: 1974, вып. 231, с. 14—27.
6. Перельштейн Л. П., Зайцев С. Д., Тетерятников В. Я. Ультразвуковой метод контроля за развитием трещин в тракторных металлоконструкциях при испытании на стенде. — Тракторы и сельхозмашины, 1980, № 7, с. 27—28.

УДК 621.865.8

Конструктивные и кинематические варианты двуруких роботов

Канд. техн. наук И. И. ПАВЛЕНКО

Перспективность применения двуруких роботов требует выявления типовых и наиболее приемлемых вариантов их кинематических схем. Основой для анализа возможных вариантов является общая кинематическая структура роботов [1], которая для двуруких исполнений (с общим числом степеней подвижности P) имеет вид

$$P = P_0 + P_{po} + \begin{cases} P_{p1} + P_{k1} \\ P_{p2} + P_{k2} \end{cases}$$

Конструктивные и кинематические варианты двуруких роботов целесообразно определять без учета степеней подвижности кинематики основания (P_0); степеней подвижности общих для кинематически связанных рук (P_{po}) и кинематики кистей (P_k). Эти степени подвижности представляют отдельные кинематические группы, которые можно анализировать независимо, как при одноруких роботах [2, 3].

Под конструктивными вариантами двуруких роботов следует понимать такие, которые отличаются

распределением степеней подвижности между руками; составом кинематических пар; их видом движения и относительным расположением по каждой руке, т. е. теми признаками, которые в наиболее общем виде характеризуют особенности конструктивного исполнения робота.

Общее количество степеней подвижности робота (P) можно различным образом распределить между руками, например, пять степеней подвижности можно распределить как

$$P = \begin{matrix} 1 \\ \diagdown \quad \diagup \\ 4 \end{matrix}; \quad P = \begin{matrix} 2 \\ \diagdown \quad \diagup \\ 3 \end{matrix}; \quad P = \begin{matrix} 3 \\ \diagdown \quad \diagup \\ 2 \end{matrix}; \quad P = \begin{matrix} 4 \\ \diagdown \quad \diagup \\ 1 \end{matrix}.$$

Варианты распределения $P = \begin{matrix} 1 \\ \diagdown \quad \diagup \\ 4 \end{matrix}$ и $P = \begin{matrix} 4 \\ \diagdown \quad \diagup \\ 1 \end{matrix}$;

$$P = \begin{matrix} 2 \\ \diagdown \quad \diagup \\ 3 \end{matrix} \quad \text{и} \quad P = \begin{matrix} 3 \\ \diagdown \quad \diagup \\ 2 \end{matrix}$$

являются подобными. Количество вариантов распределения степеней подвижности между руками без учета повторения (или подобия)

$$m_p = 0,25 \{2P - [1 - (-1)^P]\}.$$

Выбрав нужный вариант распределения степеней подвижности между руками, необходимо учитывать, что одно и то же число степеней подвижности можно получить различным составом кинематических пар. Четыре степени подвижности можно обеспечить, например, вариантами III—V, IV—IV; IV—V—V; V—V—V—V.

Для двуруких роботов, таким образом, имеются различные варианты комбинаций состава кинематических пар первой и второй рук. Количество вариантов комбинаций равно произведению количества вариантов состава кинематических пар первой (m_{c_1}) и второй (m_{c_2}) рук, т. е. $m_c = m_{c_1} m_{c_2}$.

Приведенная формула приемлема для кинематических схем с различным количеством степеней подвижности рук. В схемах с одинаковым количеством степеней подвижности имеются тождественные варианты. Например, для робота с тремя степенями подвижности каждой руки возможны следующие варианты состава кинематических пар:

$$\begin{aligned} P_{11} &= \begin{matrix} \text{III} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{III} \end{matrix}; & P_{12} &= \begin{matrix} \text{III} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{IV V} \end{matrix}; & P_{13} &= \begin{matrix} \text{III} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{V V V} \end{matrix}; \\ P_{21} &= \begin{matrix} \text{IV V} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{III} \end{matrix}; & P_{22} &= \begin{matrix} \text{IV V} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{IV V} \end{matrix}; & P_{23} &= \begin{matrix} \text{IV V} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{V V V} \end{matrix}; \\ P_{31} &= \begin{matrix} \text{V V V} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{III} \end{matrix}; & P_{32} &= \begin{matrix} \text{V V V} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{IV V} \end{matrix}; & P_{33} &= \begin{matrix} \text{V V V} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{V V V} \end{matrix}. \end{aligned}$$

Из этих вариантов тождественными следует считать P_{12} и P_{21} ; P_{13} и P_{31} ; P_{23} и P_{32} , т. е. те, которые

отличаются взаимным положением рук относительно корпуса робота. Количество различных вариантов состава кинематических пар (m_{c_p}) равно разности общего количества вариантов (m_c) и тождественных (m_{c_T}), т. е.

$$m_{c_p} = m_c - m_{c_T} = m_{c_{1,2}} \frac{m_{c_{1,2}} + 1}{2},$$

где $m_{c_{1,2}} = m_{c_1} = m_{c_2}$.

Для роботов, состоящих из пар V класса, каждая из рук имеет только один вариант состава пар, следовательно, единственный вариант будет и для всего робота.

Конструктивные варианты при заданном составе кинематических пар каждой руки отличаются между собой только порядком расположения кинематических пар в схеме рук робота. Количество этих вариантов (m_n) равно произведению количества вариантов первой (m_{n_1}) и второй (m_{n_2}) рук, т. е.

$$m_n = \frac{N_1!}{P_{III_1}! P_{IV_1}! P_{V_1}!} 2^{p_{v_1}} \frac{N_2!}{P_{III_2}! P_{IV_2}! P_{V_2}!} 2^{p_{v_2}},$$

где P_{III} ; P_{IV} ; P_V — количество кинематических пар III, IV, V классов; $N = P_{III} + P_{IV} + P_V$ — общее количество кинематических пар рук.

Для кинематических схем, состоящих только из пар V класса, количество вариантов $m_n = = 2^{p_{v_1}} 2^{p_{v_2}} = 2^p$.

Приведенные формулы определяют общее количество вариантов роботов с различным числом кинематических пар рук ($N_1 \neq N_2$) или же при равном числе пар, но при разном составе пар и их видах движений. В противном случае будут тождественные варианты, как и при рассмотрении вариантов состава кинематических пар. Например, для робота, в котором каждая из рук включает по одной паре III и V классов, могут быть варианты

$$\begin{aligned} P_{11} &= \begin{matrix} \text{III V} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{III V} \end{matrix}; & P_{12} &= \begin{matrix} \text{III V} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{V III} \end{matrix}; \\ P_{21} &= \begin{matrix} \text{V III} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{III V} \end{matrix}; & P_{22} &= \begin{matrix} \text{V III} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{V III} \end{matrix}. \end{aligned}$$

Из этих вариантов тождественными будут P_{12} и P_{21} . Подобное тождество будет и при условии, если пару V класса заменять поступательным или вращательным движением.

Таким образом, количество различных вариантов (m_{n_p}) также определяется как разность общего количества вариантов (m_n) и тождественных вариантов (m_{n_T}), т. е.

$$m_{n_p} = m_{n_{1,2}} \frac{m_{n_{1,2}} + 1}{2}$$

Число степеней подвижности рук	Варианты распределения степеней подвижности между руками	Варианты состава кинематических пар и порядка расположения пар (последние приведены в скобках возле исходного варианта)	
		с использованием пар III, IV, V классов	с использованием только пар V класса
2	$\begin{matrix} /1 \\ \backslash1 \end{matrix}$	—	$\begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix}$
3	$\begin{matrix} /1 \\ \backslash2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} /V \\ \backslashIV \end{matrix}$	$\begin{matrix} /V \\ \backslashVV \end{matrix}$
4	$\begin{matrix} /1 \\ \backslash3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} /V \\ \backslashIII \end{matrix}; \begin{matrix} /V \\ \backslashIV \end{matrix} V \left(\begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} IV \right)$	$\begin{matrix} /V \\ \backslashVVV \end{matrix}$
	$\begin{matrix} /2 \\ \backslash2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} /IV \\ \backslashIV \end{matrix}; \begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} V$	$\begin{matrix} /VV \\ \backslashVV \end{matrix}$
5	$\begin{matrix} /1 \\ \backslash4 \end{matrix}$	$\begin{matrix} /V \\ \backslashIII \end{matrix} IV \left(\begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} III \right); \begin{matrix} /V \\ \backslashIV \end{matrix} IV; \begin{matrix} /V \\ \backslashIV \end{matrix} V V \left(\begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} IV V; \begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} V IV \right)$	$\begin{matrix} /V \\ \backslashVVVV \end{matrix}$
	$\begin{matrix} /2 \\ \backslash3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} /IV \\ \backslashIII \end{matrix}; \begin{matrix} /IV \\ \backslashIV \end{matrix} V \left(\begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} IV \right); \begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} V V; \begin{matrix} /VV \\ \backslashIII \end{matrix}; \begin{matrix} /VV \\ \backslashIV \end{matrix} V \left(\begin{matrix} /VV \\ \backslashV \end{matrix} IV \right)$	$\begin{matrix} /VV \\ \backslashVVV \end{matrix}$
6	$\begin{matrix} /1 \\ \backslash5 \end{matrix}$	$\begin{matrix} /V \\ \backslashIII \end{matrix} IV \left(\begin{matrix} /V \\ \backslashIV \end{matrix} III \right); \begin{matrix} /V \\ \backslashIII \end{matrix} V V \left(\begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} III V; \begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} V III \right); \begin{matrix} /V \\ \backslashIV \end{matrix} IV V \left(\begin{matrix} /V \\ \backslashIV \end{matrix} V IV; \begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} V IV \right); \begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} IV IV; \begin{matrix} /IV \\ \backslashIV \end{matrix} V V V \left(\begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} IV V V; \begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} V IV V; \begin{matrix} /V \\ \backslashV \end{matrix} V V IV \right)$	$\begin{matrix} /V \\ \backslashVVVVV \end{matrix}$
	$\begin{matrix} /2 \\ \backslash4 \end{matrix}$	$\begin{matrix} /IV \\ \backslashIII \end{matrix} V \left(\begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} III \right); \begin{matrix} /IV \\ \backslashIV \end{matrix} IV; \begin{matrix} /IV \\ \backslashIV \end{matrix} V V; \left(\begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} IV V; \begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} V IV \right); \begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} V V V; \begin{matrix} /VV \\ \backslashIII \end{matrix} V \left(\begin{matrix} /VV \\ \backslashV \end{matrix} V III \right); \begin{matrix} /VV \\ \backslashIV \end{matrix} IV; \begin{matrix} /VV \\ \backslashIV \end{matrix} V V \left(\begin{matrix} /VV \\ \backslashV \end{matrix} IV V; \begin{matrix} /VV \\ \backslashV \end{matrix} V IV \right)$	$\begin{matrix} /VV \\ \backslashVVVV \end{matrix}$
	$\begin{matrix} /3 \\ \backslash3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} /III \\ \backslashIII \end{matrix}; \begin{matrix} /III \\ \backslashIV \end{matrix} V \left(\begin{matrix} /III \\ \backslashV \end{matrix} IV \right); \begin{matrix} /III \\ \backslashV \end{matrix} V V; \begin{matrix} /IV \\ \backslashIV \end{matrix} V \left(\begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} IV; \begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} V IV \right); \begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} V V \left(\begin{matrix} /IV \\ \backslashV \end{matrix} V V \right)$	$\begin{matrix} /VVV \\ \backslashVVV \end{matrix}$

Для робота, содержащего только пары V класса

$$m_{np} = 2^{\frac{p}{2}-1} \left(2^{\frac{p}{2}} + 1 \right).$$

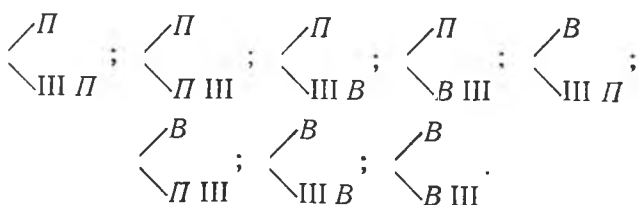
На основании приведенных формул можно определить общее количество конструктивных вариантов робота, которое будет равно сумме по всем вариантам состава кинематических пар рук и всем вариантам распределения степеней подвижности между руками:

$$m = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{m_i} m_{n_{ij}}.$$

где m_{n_i} — количество конструктивных вариантов при принятом распределении степеней подвижности между руками и составе их кинематических пар.

Примеры конструктивных вариантов роботов с числом степеней подвижности рук от двух до шести приведены в таблице. Для упрощения, в таблице не отражены варианты, различающиеся характером выполнения пар V класса (поступательная — П, вращательная — В). Так, например, конструк-

тивный вариант $\begin{matrix} /V \\ \backslashIII \end{matrix} V$ можно дополнительно конкретизировать:



Подобным образом могут быть представлены конструктивные варианты роботов с любым числом степеней подвижности рук, включающие кинематические пары V класса.

В ряде практических случаев количество анализируемых вариантов может быть значительно сокращено, если заранее выбран нужный вариант распределения степеней свободы и состав кинематических пар рук.

Каждый конструктивный вариант имеет ряд кинематических вариантов, которые отличаются между собой направлением движений по отдельным кинематическим парам без изменения их класса, вида и положения в схеме робота. При этом также необходимо учитывать характер выполнения пар V класса: поступательные (P и P') и вращательные (B и B') [3]. Количество кинематических вариантов для каждой руки определяется аналогично одно-руким роботам. Следовательно, суммарное количество вариантов равно утроенному произведению количества вариантов первой (n_1) и второй (n_2) рук (первые кинематические пары рук между собой могут быть параллельны — \parallel ; перпендикулярны — \perp , или скрещивающиеся — \times).

Для роботов, кинематика рук которых состоит из любых пар,

$$n = 3 \left[2^{P_{V1}} 3^{(N_1-1)} \right] \left[2^{P_{V2}} 3^{(N_2-1)} \right];$$

для роботов, выполненных только из пар V класса,

$$n = 3 \left[2^{P_{V1}} 3^{(P_{V1}-1)} \right] \left[2^{P_{V2}} 3^{(P_{V2}-1)} \right].$$

Приведенные формулы определения кинематических вариантов приемлемы для кинематических схем рук робота, имеющих разное количество степеней подвижности или при равном количестве степеней подвижности, разный состав и порядок пар. Если же руки робота имеют одинаковое количество степеней подвижности, состав и порядок пар, то при этом имеются тождественные варианты (n_T). Приняв условие, что $n_1 = n_2 = n_{1,2}$, количество различных вариантов

$$n_p = 3(n - n_T) = 3n_{1,2} \frac{n_{1,2} + 1}{2}.$$

В двуруких роботах направления движения в кинематических парах каждой руки, как и в одно-руких роботах, целесообразно совмещать с осями координат, что способствует увеличению рабочих зон рук и других их кинематических возможностей. Кинематические варианты робота, содержащего по одной степени подвижности каждой руки с соот-

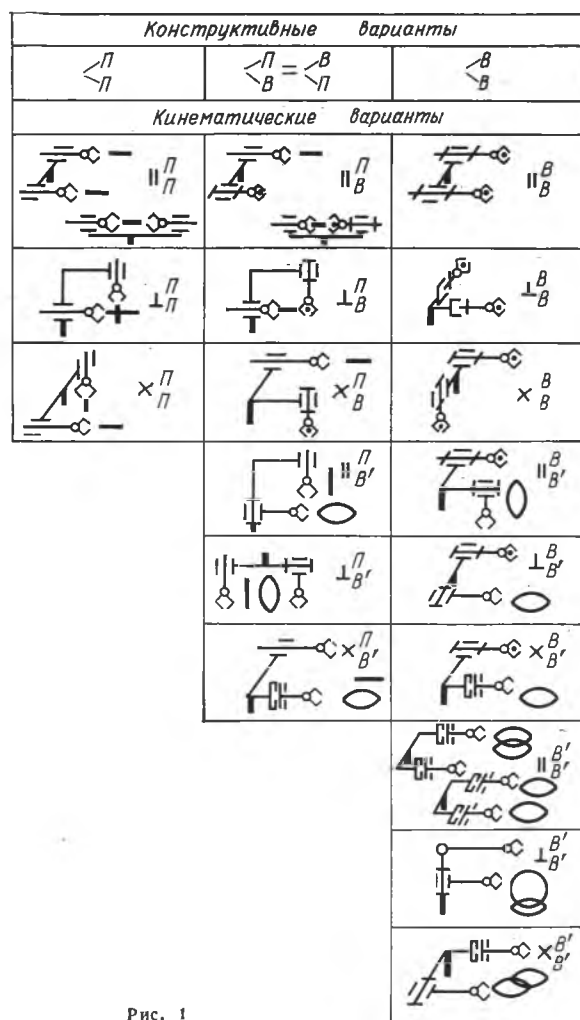


Рис. 1

ветствующими им структурными формулами и рабочими зонами приведены на рис. 1. При построении этих схем не учитывались варианты с использованием поступательной пары в виде изогнутого звена P' , так как это не приводит к появлению вариантов с новыми рабочими зонами и другими отличительными признаками. В структурных формулах рис. 1 первый знак указывает направление движений первых кинематических пар рук робота между собой.

Если взаимное направление движения между кинематическими парами каждой руки целесообразно совмещать с осями координат, то направление движения между первыми кинематическими парами рук может быть любым. Это обычно зависит от конкретного целевого назначения робота. Поэтому утроенное произведение вариантов первой и второй рук в приведенных формулах, как и представленные на рис. 1 схемы, определяет только предельные варианты взаимного направления (параллельные, перпендикулярные и скрещивающиеся) первых кинематических пар рук. Между этими

предельными вариантами могут быть любые промежуточные с различным взаимным наклонным расположением первых кинематических пар рук робота. Так, например, для конструктивного ва-

рианта $\left(\begin{smallmatrix} \angle P \\ \angle P \end{smallmatrix} \right)$ промежуточными кинематическими

вариантами могут быть схемы, представленные на рис. 2, а. К этому следует добавить, что дополнительные варианты могут быть и для предельных схем, примеры которых на рис. 1 показаны для

вариантов $\left(\begin{smallmatrix} \parallel P \\ \parallel P \end{smallmatrix} \right)$; $\left(\begin{smallmatrix} \parallel P \\ \parallel B \end{smallmatrix} \right)$; $\left(\begin{smallmatrix} \parallel B' \\ \parallel B' \end{smallmatrix} \right)$.

Подобным образом могут быть определены кинематические варианты роботов с любым количеством степеней подвижности рук. Для этого необходимо использовать типовые кинематические варианты одноруких роботов [3], которые в этих условиях должны быть представлены в различных комбинациях двух рук. Так, для робота с тремя

степенями свободы рук и структурой $\begin{smallmatrix} \angle P \\ \angle B' \perp P \end{smallmatrix}$

предельные кинематические варианты показаны на рис. 2, б.

Выбор практически целесообразных вариантов и для двуруких роботов должен определяться величиной, формой, характером образования и степенью перекрытия (пересечения) рабочих зон рук робота, а также возможностями независимых, совместных и относительных перемещений и ориентирований схватов рук и других требований [4].

Из приведенного следует, что использование предложенного метода позволяет подробно разобратся в многообразии возможных вариантов

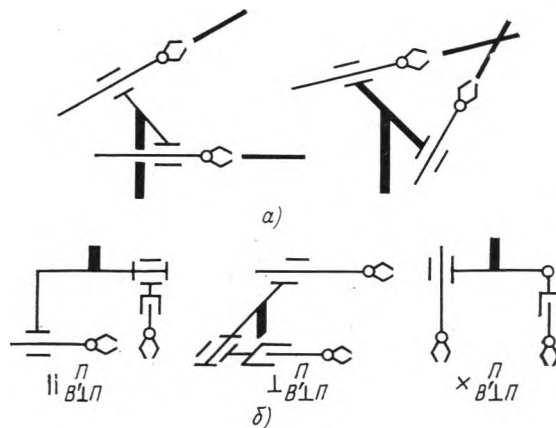


Рис. 2

и более обоснованно решать вопрос выбора типовых и наиболее приемлемых кинематических схем двуруких роботов. Предложенный метод можно распространить на анализ кинематических схем многоруких роботов.

Список литературы

1. Павленко И. И. Кинематическая структура промышленных роботов. — Изв. вузов «Машиностроение», 1977, № 9, с. 25—28.
2. Автоматические манипуляторы с программным управлением (промышленные роботы). Состояние, перспективы, проблемы/А. Е. Кобринский, А. И. Корендасев, Б. Л. Саламандра, Л. И. Тывес — Станки и инструмент, 1974, № 11, с. 4—11.
3. Павленко И. И. Конструктивные и кинематические варианты промышленных роботов. — Вестник машиностроения, 1980, № 11, с. 3—5.
4. Павленко И. И. Анализ двигательных возможностей роботов. Вторая Всесоюз. научн.-техн. конф. «Робототехнические системы». Киев: КПИ 1980, с. 64—66.

УДК 621.225-52

Учет влияния колебаний объемных потерь в гидромоторах следящих приводов

Инж. В. Г. НЕХОДА, инж. Г. А. АВРУНИН

Одной из особенностей рабочего процесса объемного гидромотора является колебательный характер зависимости объемных потерь от угловой координаты вала [1], влияющий на ряд параметров привода. Степень влияния колебаний зависит от способа управления приводом, структуры привода, схемы, условий и режима работы. Учет этого влияния особенно важен при создании замкнутых электрогидравлических систем, предназначенных для регулирования скорости в широких пределах и отработки заданной координаты с высокой точностью.

Влияние колебаний объемных потерь на характеристики привода и возможности его количественной оценки рассмотрим на примере двухконтурного позиционного сле-

дящего привода с аксиально-поршневым регулируемым насосом с пропорциональным электрическим управлением и нерегулируемым гидромотором.

На рис. 1 и 2 приведены функциональная и свернутая структурная схемы привода. Выражение для передаточной функции $W_4(p)$ получено на основании системы линеаризованных дифференциальных уравнений [2], составленных применительно к приводу с радиально-поршневым гидромотором и учитывающих конструктивные особенности последнего, и имеет вид

$$W_4(p) = \frac{\Omega_\partial(t)}{e(t)} = \frac{k_4}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1},$$